



5. Антонов Ю.Н., Применение информационных технологий для повышения эффективности лазерной подгонки пленочных резисторов / Перспективные информационные технологии (ПИТ 2013). Труды МНТК / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2013. – 488 с.

П.Г. Антропов, О.Н. Долинина, А.Ю. Шварц

СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

(ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им.
Гагарина Ю.А.»)

Одной из важнейших задач систем транспорта и хранения природного газа ОАО «Газпром» является бесперебойность и высокая эффективность поставки природного газа на потребительский рынок в нашей стране и за рубежом. Выполнение этой задачи невозможно без реализации системы мер направленных на обеспечение эффективной и долгосрочной работы основного оборудования компрессорных станций – газоперекачивающих агрегатов (ГПА), которых по стране насчитывается несколько тысяч. Эта реализуемая система мер должна предусматривать комплексы взаимосвязанных мероприятий направленных , в том числе, на мониторинг технического состояния оборудования как первооснову безопасной и эффективной эксплуатации.

Отечественный парк ГПА характеризуется широким диапазоном эффективных мощностей (2,5...25 МВт), наработок (до 100 тысяч часов и более), условиями эксплуатации и сервисного обслуживания и т.п.. В силу этой неоднородности показатели надежности и эффективности работы, даже однотипных агрегатов в различных дочерних обществах и на разных промплощадках могут существенно различаться. Кроме того, необходимо отметить, что и сама газотранспортная система страны была в целом сформирована к середине 80-х годов 20-го века, но изменение политической и экономической конъюнктуры за этот период приводили к существенному перераспределению нагрузки по существующим направлениям, соответственно изменялась и загруженность, и степень изношенности основного оборудования. Учитывая его непрерывное старение в условиях наметившейся диверсификации потоков поставок природного газа в Европу, основными направлениями повышения эффективности и надежности работы действующих ГПА могли бы быть поддержание их экономичности, оптимизация режимов эксплуатации, качества ремонта и обслуживания, а так же учет экологической приемлемости. Принципиальные возможности достижения этих целей базируются на качественном и своевременном техническом обслуживании и ремонте ГПА, продлении ресурса его эксплуатации без ущерба для показателей эффективности, а также, по возможности, обоснован-



ное прогнозирование сроков реконструкции и замены агрегатов. Таким образом, требуется решение как теоретических, так и практических задач достоверного анализа надежности и безопасности сложных технических систем. Разработка эффективных методов контроля и прогнозирования технического состояния ГПА по основным термодинамическим и технологическим параметрам с возможностью выявления дефектов на ранней стадии могло бы лечь в основу решения приоритетной задачи повышения надежности и эффективности газотранспортных систем.

Комплексная оценка технического состояния сложных технических систем базируется на иерархическом структурировании, анализе надежности структурных элементов и динамических методах контроля. Во многом результат диагностирования технического состояния ГПА предопределяется правильностью подбора наиболее информативных параметров контроля: вибрация, перепады давления, температур, эффективных КПД и др., а также корректностью построения принципиальных диагностических моделей и методик распознавания.

Описание проблемы

Сложность объекта исследования не позволяет получить универсальное решение, что вызывает трудности при разработке алгоритмов диагностики неисправностей и требует сочетания различных методик и подходов.

Исследованию задач повышения надежности энергетического оборудования и трубопроводных систем в разное время были посвящены работы С.П. Зарицкого [1], В.А. Иванова [2], В.А. Острейковского [3], Е.А. Ларина [4] и многих других. Исследования по повышению эксплуатационной надежности ГПА проводились ООО «Газпром ВНИИГАЗ», РГУНиГ им.И.М. Губкина, ООО «Оргэнергогаз», ВНИИЭГазпром, ТюмГНГУ, СГТУ им. Гагарина Ю.А. и рядом других.

В работе [5] описано исследование, направленное на повышение информативности и достоверности параметров, влияющих на остаточный ресурс ГПА. Была предложена методика прогнозирования остаточного ресурса и изменения технического состояния ГПА компрессорных станций с газотурбинным приводом. Также были разработаны основные принципы выбора критериев оценки технического состояния для ГПА-16МГ-90 и «Коберра-182», проведен анализ функциональных зависимостей и взаимного влияния узлов данных типов ГПА.

Однако применение любых методов диагностики и прогнозирования к газоперекачивающим агрегатам подразумевает регулярный сбор данных о техническом состоянии, как всей установки, так и отдельных ее компонентов. В настоящее время наибольшее распространение получила автоматизированная система диагностического обслуживания АСДО [6], которая внедрена на ряде предприятий ОАО «Газпром», ООО «Газпром добыча Надым», ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург» и выполняет следующие функции: формирование математической модели исправного агрегата на основе полученных во время эксплуатационных технических испытаний; расчет термогазодинамических па-



раметров состояния проточных частей центробежного нагнетателя (ЦН) и газотурбинной установки (ГТУ) и прогноз изменения их значений; отслеживание выхода параметров из допустимого диапазона и формирование диагностических сообщений для оповещения; формирование рекомендаций; накопление и визуализация результатов параметрической диагностики.

Также распространенным в России программным комплексом является Compressor Performance Advisor от компании Compressor Controls Corporation. В число функций данного комплекса входит: создание математических моделей производительности ГПА; вычисление, мониторинг и хранение показателей эффективности и производительности; отслеживание критических отклонений и выдача предупреждений; выявление трендов в изменениях значений параметров.

К недостаткам такого рода систем можно отнести отсутствие функционала выдачи предположений по причинам возникающих отказов. Таким образом, система не оказывает достаточной поддержки в принятии решения для обслуживающего персонала, что понижает степень достоверности определения причин возникновения неисправности в силу различного уровня экспертных знаний и опыта работы у эксплуатационного персонала. Кроме того, заложенный в систему математический аппарат не отражает неуверенностей и неточностей, присущих утверждениям в любой предметной области.

Постановка задачи

В силу сложности и многокомпонентности объекта диагностирования задача выявления и предупреждения неисправностей сводится не только к контролю значений каждого параметра агрегата по отдельности. Выявление и предупреждение неисправностей установки может быть осуществлено только на основе анализа как системы в целом, так и ее структурных компонентов, также являющихся, в свою очередь, сложными системами. В частности, характерным признаком появления неисправности может являться не только критическое значение определенных параметров, но и динамика их изменения в рамках допускаемых технической документацией значений.

Взаимосвязь изменения параметров, наличия неисправностей и причин их возникновения имеет сложный характер. Для моделирования такого рода зависимостей более всего подходят методы искусственного интеллекта (ИИ), позволяющие описывать причинно-следственные связи между данными как числовой, так и нечисловой природы [7]. Также зависимости между параметрами могут иметь неявный характер, а система, оперирующая такими параметрами, должна предусматривать возможность неточностей и частичных неопределенностей в описании причинно-следственных связей.

Кроме того, применение методов ИИ для диагностирования неисправностей ГПА позволяет выполнять основные требования к диагностике: точность, достоверность и быстродействие.

Под точностью будем понимать степень совпадения реального значения диагностируемого параметра и значения, вычисленного системой диагностики.



Под достоверностью будем понимать степень уверенности в истинности утверждения, выдаваемого системой диагностики (например, о наличии определенного вида неисправности или набора вызвавших ее причин). В случае интеллектуальных систем точность и достоверность достигаются за счет использования экспертных знаний, а также многократной перенастройки (обучения) системы на основе исходных и вновь поступающих экспериментальных данных.

Под быстродействием будем понимать количество решений, даваемых системой за единицу времени. Выбор оптимального способа представления знаний в интеллектуальной системе, механизмов принятия решений и программно-аппаратной реализации позволяет удовлетворить требованиям к быстродействию системы диагностики.

Таким образом, использование методов ИИ в разработке программного комплекса диагностики неисправностей ГПА позволит в необходимой степени удовлетворить основным требованиям к диагностике и создать расширяемую платформу для дальнейшей доработки и модификации.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается газоперекачивающий агрегат с газотурбинным приводом, принципиальная схема которого приведена на рис.1.

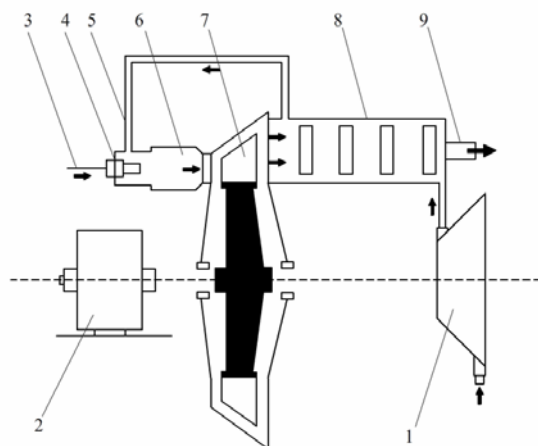


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинной установки с регенерацией
(1 – компрессор, 2 – потребитель, 3 – топливный трубопровод, 4 – форсунка,
5 – воздушный трубопровод, 6 – камера сгорания, 7 – лопатки турбины,
8 – теплообменник, 9 - патрубок)

Для анализа связи параметров ГПА, неисправностей и их причин было сформировано множество $Y = \{y_1, \dots, y_{18}\}$, где каждому элементу поставлена в соответствие степень уверенности в наличии определенной неисправности: y_1 - изменение проходной площади соплового аппарата турбины высокого давления (ТВД); y_2 - увеличение радиальных зазоров осевого компрессора (ОК); y_3 - увеличение радиальных зазоров турбины; y_4 - увеличение зазоров в концевых уплотнителях; y_5 - негерметичность воздушного тракта регенератора; y_6 - вредный подогрев на входе компрессора; y_7 - увеличение сопротивления входного тракта ГТУ; y_8 - увеличение сопротивления тракта высокого давления; y_9 - увеличение



сопротивления выходного тракта ГТУ; y_{10} - загрязнение проточной части компрессора; y_{11} - эрозия элементов проточной части центробежного нагнетателя (ЦН); y_{12} - увеличение зазора в уплотнениях ЦН; y_{13} - уменьшение запаса устойчивой работы ОК (предпомпаж); y_{14} - уменьшение запаса устойчивой работы ЦН; y_{15} - выгорание элементов камеры сгорания (КС); y_{16} - коробление, занос, обрыв лопастного аппарата турбины высокого давления (турбины низкого давления); y_{17} - негерметичность проточной части газотурбинного двигателя (ГТД); y_{18} - занос фильтрующих элементов воздухозаборной камеры (ВЗК).

В ходе анализа предметной области было сформировано множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{26}\}$, каждому элементу которого поставлено в соответствие значение параметров ГПА: x_1 - барометрическое давление; x_2 - температура наружного воздуха; x_3 - разрежение перед ОК; x_4 - температура перед ОК; x_5 - давление за ОК; x_6 - температура за ОК; x_7 - давление за регенератором; x_8 - температура за регенератором; x_9 - температура перед ТВД; x_{10} - давление за ТНД №1; x_{11} - давление за ТНД №2; x_{12} - температура за ТНД; x_{13} - обороты ротора ТВД; x_{14} - обороты ротора ТНД; x_{15} - давление газа перед нагнетателем; x_{16} - давление газа за нагнетателем; x_{17} - температура газа за нагнетателем; x_{18} - температура газа перед нагнетателем; x_{19} - разница температур газа на входе и выходе ОК; x_{20} - расход воздуха через ОК; x_{21} - эффективный КПД; x_{22} - КПД нагнетателя; x_{23} - степень сжатия; x_{24} - частота вращения ротора силовой турбины (ССТ или ТНД); x_{25} - уровень вибрации; x_{26} - уровень шума.

Кроме того, каждая неисправность может быть вызвана одной или несколькими эксплуатационными или иными причинами. Было сформировано множество $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{26}\}$, каждому элементу которого поставлено в соответствие степень уверенности в наличии определенной причины неисправностей: z_1 - коробление обоймы; z_2 - деформация, обрывом лопаток; z_3 - вибрация ротора; z_4 - перекося, расцентровка ротора; z_5 - дефекты подшипников; z_6 - температурные деформации при пусках и остановках ГПА; z_7 - отсутствие изоляции на регенераторах и газоходах; z_8 - неправильная компоновка ГПА на КС; z_9 - неплотность запорных клапанов систем анти-обледенения, тяги регенератора; z_{10} - обледенение входного тракта; z_{11} - пылевые отложения во входном тракте; z_{12} - эрозия (износ) входного тракта ГТУ; z_{13} - пылевые отложения в тракте высокого давления; z_{14} - эрозия (износ) тракта высокого давления; z_{15} - деформация выходного тракта ГТУ; z_{16} - рост отложений в выходном тракте ГТУ; z_{17} - уменьшение эффективности очистки воздуха, невыполнение периодических чисток; z_{18} - уменьшение эффективности очистки технологического газа (пылеуловители); z_{19} - вибрация, осевой сдвиг ЦН; z_{20} - уменьшение проходной площади ТВД; z_{21} - увеличение сопротивления входного тракта; z_{22} - ускоренный запуск; z_{23} - износ лопаток; z_{24} - уменьшение массового расхода воздуха; z_{25} - увеличение степени сжатия при постоянной частоте вращения ротора ($n_{cm} = const$); z_{26} - подрез рабочего колеса.

Кроме причинно-следственных связей между параметрами системы и неисправностями, а также неисправностями и их эксплуатационными системами, существуют также связи между самими параметрами, между неисправностями



и между их причинами. Наличие сложных транзитивных зависимостей обуславливает структуру разрабатываемой интеллектуальной системы.

Интеллектуальная система для принятия решения по диагностике неисправностей ГПА

Разработанный программный комплекс GAZDETECT для диагностики неисправностей ГПА основан на гибридной интеллектуальной системе, структура которой приведена на рис. 2. Основными компонентами системы являются искусственная нейронная сеть (ИНС) и подсистема нечеткого вывода.

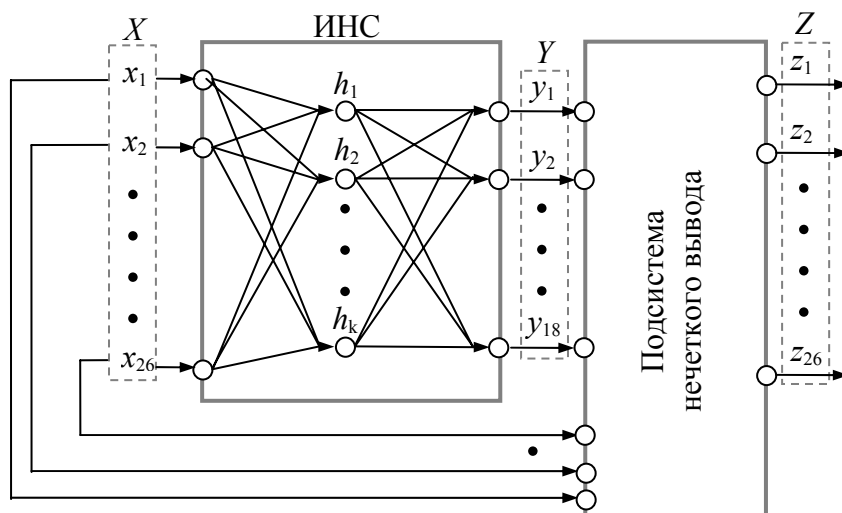


Рис. 2. Схема интеллектуальной системы принятия решения по диагностике неисправностей ГПА.

$X = \{x_1, \dots, x_{26}\}$ – входной вектор системы, содержащий числовые значения параметров ГПА;

h_1, \dots, h_k – нейроны скрытого слоя ИНС;

$Y = \{y_1, \dots, y_{18}\}$ – выходной вектор ИНС и входной вектор подсистемы нечеткого вывода, содержащий степени уверенности в наличии характерных неисправностей;

$Z = \{z_1, \dots, z_{26}\}$ – выходной вектор системы, содержащий степени уверенности в наличии причин неисправностей.

Степени уверенности в наличии неисправностей и их причин лежат на интервале $[0;1]$, где 0 – самая низкая степень уверенности, 1 – самая высокая.

ИНС служит для выявления неисправностей на основе значений и динамики изменения параметров ГПА. Полученные степени уверенности в совокупности с уже поданными на вход ИНС параметрами используются подсистемой нечеткого вывода для выявления возможных причин возникновения неисправностей.

ИНС имеет структуру трехслойного персептрона, обученного алгоритмом обратного распространения ошибки. Обучающая выборка была составлена на основе норм технологического проектирования магистральных газопроводов [8] и мнений экспертов - специалистов по техническому обслуживанию ГПА.



Подсистема нечеткого вывода

Подсистема нечеткого вывода основана на использовании экспертных правил, использующих аппарат теории нечетких множеств. Структурная схема подсистемы представлена на рис. 3.

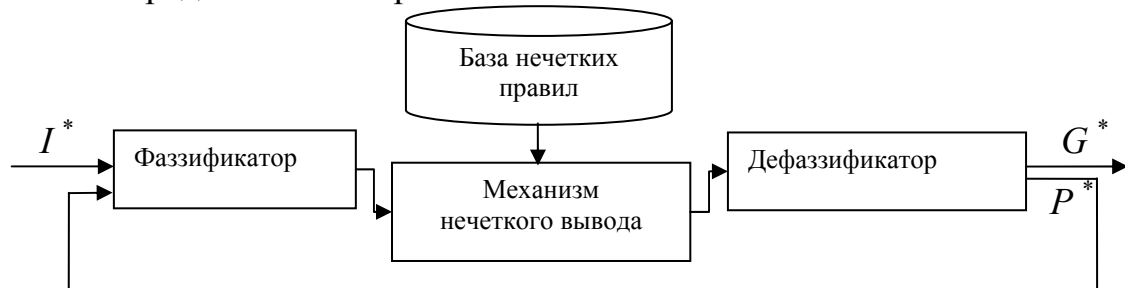


Рис. 3. Схема подсистемы нечеткого вывода

I^* - вектор входных числовых значений подсистемы;

G^* - вектор выходных числовых значений подсистемы;

P^* - вектор промежуточных числовых значений подсистемы.

Рассматриваемая база нечетких правил может быть представлена в виде

$$(V, I, G, P, R), \quad (1)$$

где V - универсальное множество лингвистических переменных системы,

I - множество входных лингвистических переменных, $I \subset V$,

G - множество выходных лингвистических переменных, $G \subset V$,

P - множество промежуточных лингвистических переменных, $P \subset V$,

R - множество правил вида

$$\begin{aligned} &\langle r_j, u_j \rangle: \\ &\text{ЕСЛИ } v_{j,1} \text{ есть } t_{j,1} \text{ И } \dots \text{ И } v_{j,m-1} \text{ есть } t_{j,m-1} \\ &\text{ТО } v_{j,m} \text{ есть } t_{j,m}, \end{aligned}$$

где r_j - уникальное имя правила,

u_j - лингвистическая степень уверенности в истинности правила r_j ,

$v_{j,1}, \dots, v_{j,m-1}$ - входные лингвистические переменные для правила r_j ,

$t_{j,1}, \dots, t_{j,m-1}$ - значения входных лингвистических переменных для правила r_j ,

$v_{j,m}$ - выходная лингвистическая переменная для правила r_j ,

$t_{j,m}$ - значение выходной лингвистической переменной для правила r_j .

Будем считать, что на вход подсистемы подается вектор I^* четких значений, соответствующих лингвистическим переменным множества I . Выходом подсистемы является вектор G^* четких значений, соответствующих лингвистическим переменным множества G .

Утверждением будем считать пару

$$\langle v_m, t_{m,k} \rangle, \quad (2)$$

где $v_m \in V$ - лингвистическая переменная,

$t_{m,k} \in T(v_m)$ - значение лингвистической переменной.



Каждому утверждению в соответствие поставлена нечеткая переменная $f_{m,k}$.

Будем считать входными правила $r_j \in R$, в левой части которых содержатся только те утверждения, которые содержат входные лингвистические переменные.

В ходе консультаций с экспертами было определено множество $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ (t_1 – “очень низкое“, t_2 – “низкое“, t_3 – “среднее“, t_4 – “высокое“, t_5 – “очень высокое“) лингвистических значений, связанных с числовыми значениями параметров функциями принадлежности. Кроме того, были определены исключительные ситуации, когда значением лингвистической переменной является не выражение на естественном языке, а утверждение вида “ $x_i > b_i$ ” или “ $x_i < b_i$ ”, где x_i – числовое значение параметра, b_i – определенная экспертом верхняя или нижняя граница параметра, допускаемая технической документацией.

Было сформировано множество правил R , примеры которых приведены ниже.

r_{15} : ЕСЛИ <отклонение давления за ТНД №1> <очень высокое>

И <отклонение давления за ТНД №2> <очень высокое>

ТО <загрязнение проточной части компрессора> <высокое>

r_{27} : ЕСЛИ <колебание температуры за нагнетателем> <высокое>

И <колебание температуры перед нагнетателем> <высокое>

ТО <повышение вибрации> <высокое>

Алгоритм нечеткого вывода

Шаг 1. Для каждого входного правила r_j вычисляются значения истинности всех утверждений

$$\delta_{j,q} = \mu_{j,q}(v_{j,q}^*), q = \overline{1, n-1}, \quad (3)$$

где $v_{j,q}^*$ – четкое значение, соответствующее лингвистической переменной $v_{j,q}$ в левой части правила r_j .

Шаг 2. Для каждого входного правила r_j вычисляется уровень отсечения

$$\beta(<v_{j,n}, t_{j,n}>) = n-1 \sqrt[n-1]{\prod_{q=1}^{n-1} \delta_{j,q}} \quad (4)$$

Шаг 3. Для каждого входного правила r_j формируется усеченная функция принадлежности нечеткой переменной в правой части правила

$$\begin{aligned} \mu'_{f_{m,k}}(x) &= \\ &= \mu_{f_{m,k}}(x) \cdot \min_j \beta(<v_{j,n}, t_{j,n}>) \cdot \mu_u(u_j) \end{aligned} \quad (5)$$

где пара $<v_{j,n}, t_{j,n}>$ соответствует нечеткой переменной $f_{m,k}$,

$\mu_u(u_j)$ – значение функции принадлежности степеней уверенности.



Шаг 4. Для каждой лингвистической переменной $v_m \in V$, стоящей в правой части хотя бы одного входного правила r_j , формируется результирующая функция принадлежности

$$\mu_{v_m}(x) = \max_k \mu'_{f_{m,k}}(x), \quad (6)$$

Шаг 5. Для каждой лингвистической переменной $v_m = v_{j,n} \in V$, стоящей в правой части каждого входного правила r_j , вычисляется четкое значение

$$v_m^* = \frac{\int_X x \cdot \mu_{v_m}(x) dx}{\int_X \mu_{v_m}(x) dx}, \quad (7)$$

Шаг 6. Шаги 1-5 повторяются для каждого правила $r_j \in R$ до тех пор, пока не будут вычислены четкие значения, соответствующие каждой выходной лингвистической переменной. Полученные четкие значения формируют выходной вектор G^* .

Таким образом, подсистема нечеткого вывода позволяет на основе параметров ГПА и степеней уверенности в наличии определенного вида неисправностей получить степени уверенности в характерных эксплуатационных или иных причинах отказов.

Заключение

Сложность ГПА как объекта исследования не позволяет получить универсальное решение, что вызывает трудности при разработке алгоритмов диагностики неисправностей и требует сочетания различных методик и подходов. В статье показана возможность использования интеллектуальных методов для решения проблемы диагностики неисправностей ГПА на основе программной системы GAZDETECT, позволяющей на основе параметров агрегата своевременно обнаруживать характерные отказы в работе устройства, что приводит к повышению безопасности труда, обеспечивает своевременный ремонт и техническое обслуживание установки. Кроме того, установление причин неисправности повышает вероятность устранения допущенных в ходе эксплуатации нарушений или обнаружения заводских и иных дефектов в деталях оборудования.

Литература

1. Грачев В.А., Зарицкий С.П., Детков А.Ю., Мокроусов С.Н. Диагностическое обслуживание трубопроводной арматуры на предприятиях ОАО «Газпром» // Безопасность труда в промышленности. 2006. №12. С. 54-59.
2. Кокорев Е.Н., Иванов А.П., Серебрянский А.Я., Иванов В.А. Программная система моделирования режима работы сетей газоснабжения городов и населенных пунктов // Безопасность труда в промышленности. 2001. №4. С. 34-35.



3. Острейковский В.А., Силин Я.В. Применение методов теории катастроф к оценке надежности нефтепромысловых трубопроводов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. №11. С. 29-33.
4. Ларин Е.А. Вероятностная модель расчета показателей надежности теплофикационных парогазовых установок в системах теплоэнергоснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. №9-10. С. 111-122.
5. Семенов А.А. Комплексный анализ работоспособности газоперекачивающих агрегатов на основе прогноза остаточного ресурса: дис. канд. техн. наук. / ТюмГНУ. – М., 2004 – 134 с.
6. Стребков А., Басманов М., Меньшиков С., Морозов И. Система параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов: современный подход // Деловая Россия: промышленность, транспорт, социальная жизнь. 2011. №7. С. 42-43.
7. Долинина О.Н., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных объектов числовой и нечисловой природы // Вестник СГТУ. 2006. №2(12). С. 100-110.
8. Сафонов В.С., Леонтьев Е.В., Щуровский В.А. Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов // ОАО «Газпром», 2005.
9. Антропов П.Г., Замоторин В.Н., Захаров В.Н. и др. Учеб. пос. для подготовки и повышения квалификации рабочих и специалистов службы ГКС. – ЮгТрансгаз, Петровск, 2000. – 145 с.

Л.Э. Вилоп

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТИПОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА

(Самарский государственный аэрокосмический университет)

Метрологическая аттестация любого измерительного устройства заключается в определении его метрологических характеристик, включающих в себя функцию преобразования, необходимую для определения значения измеряемой величины при проведении измерений, и точностных характеристик, необходимых для определения возможной погрешности измерения.

В отличие от оценки результата измерения, которая при многократных измерениях может включать в себя среднее значение получаемых результатов и характеристики, показывающие степень отклонений получаемых результатов от этого среднего значения (например, среднеквадратическое отклонение), к точностным характеристикам средства измерения, будь то измерительный прибор, измерительная система или мера физической величины, правомерно отно-